

**МЕТАЛУРГІЯ СТАЛІ**

УДК 669.184:519.22

doi: 10.31498/2225-6733.39.2019.201041

©Бондар В.І.<sup>1</sup>, Тарасюк Л.І.<sup>2</sup>, Костиця І.М.<sup>3</sup>**ДОСЛІДЖЕННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ РОЗКИСЛЕННЯ КИСНЕВО-  
КОНВЕРТЕРНОГО НАПІВПРОДУКТУ КУСКОВИМ КАРБІДОМ КРЕМНІЮ  
З ЦІЛЮ ПОЛІПШЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ВИРОБНИЦТВА**

Раціональне розкислювання металу і шлаку, що включає технологію розкислювання і вибір розкислювачів, є найважливішою операцією сталеплавильного виробництва. Ця акція безпосередньо впливає на кількість неметалічних включень і їх властивості. Вибір типу розкислювача і технології розкислювання кожне металургійне підприємство вирішує по-своєму. Нині широке застосування знайшли різні металеві і неметалічні матеріали, які використовуються для розкислювання металу. До них відносяться традиційні – чушковий і порошкоподібний алюміній, феросплави і ті, що знайшли застосування останнім часом – відходи металургійних виробництв: шлаки алюмінієвого, ванадієвого і абразивного виробництв, карбід кремнію. Нині стало абсолютно очевидним, що використання різних видів і прийомів технології розкислювання і позапічної обробки металевого розплаву дозволяє вирішувати багато проблем в кожному конкретному виробництві. При цьому вирішувати наступні завдання: регулювати кількість і склад неметалічних включень; знижувати собівартість сталі за рахунок оптимізації металургійних акцій стосовно конкретних умов виробництва; забезпечити необхідну якість отримуваної продукції. Тому роботи, спрямовані на подальше вдосконалення прийомів позапічної обробки в кожному конкретному виробництві, являються, безумовно, перспективними і актуальними. Передумовою для вибору прийомів розкислювання і вибір розкислювачів позапічної обробки має бути комплексне дослідження металу на різних етапах металургійної переробки. У наданій роботі представлені результати дослідження процесу виробництва сталі з використанням карбіду кремнію в якості розкислювача при виробництві конвертерної сталі, що виплавляється в конвертерах місткістю 350 т з верхнім продуванням ЧАО «МК «Азовсталь». На основі даних про хімічний склад і температуру металевого розплаву, що отримані в умовах кисневої конвертації, з використанням пакету програм StatSoft Statistica 10.0 виконаний аналіз впливу карбіду кремнію, як розкислювача, на значущість відмінності середніх значень хімічного складу конвертерного розплаву.

**Ключові слова:** конвертер, металевий розплав, розкислювання, карбід кремнію, хімічний склад, відмінності середніх.

**Бондарь В.И., Тарасюк Л.И., Костиця И.Н. Исследование возможности раскисления кислородно-конвертерного полупродукта кусковым карбидом кремния с целью улучшения показателей производства. Раціональне розкислення металу і шлаку, включаюче технологію розкислення і вибір раскислителів, являється важливішою операцією сталеплавильного производства. Эта акция непосредственно влияет на количество неметаллических включений и их свойства. Выбор типа раскислителя и технологии раскисления каждое металлургическое предприятие**

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [bbvvii.47@gmail.com](mailto:bbvvii.47@gmail.com)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [leonid.47.tarasiuk@gmail.com](mailto:leonid.47.tarasiuk@gmail.com)

<sup>3</sup> провідний інженер, ТУ ММК «Азовсталь», м. Маріуполь, [igor27985@gmail.com](mailto:igor27985@gmail.com)

решает по-своему. В настоящее время широкое применение нашли различные металлические и неметаллические материалы, используемые для раскисления металла. К ним относятся традиционные – чушковый и порошкообразный алюминий, ферросплавы и нашедшие применение в последнее время отходы металлургических производств: шлаки алюминиевого, ванадиевого и абразивного производств, карбид кремния. В настоящее время стало совершенно очевидным, что использование различных видов и приемов технологии раскисления и внепечной обработки металлического расплава позволяет решать многие проблемы в каждом конкретном производстве. При этом решают следующие задачи: регулировать количество и состав неметаллических включений; снизить себестоимость стали за счет оптимизации металлургических переделов применительно к конкретным условиям производства; обеспечить требуемое качество получаемой продукции. Поэтому работы, направленные на дальнейшее совершенствование приемов внепечной обработки в каждом конкретном производстве, являются, безусловно, перспективными и актуальными. Предпосылкой для выбора приемов раскисления и выбор раскислителей внепечной обработки должно быть комплексное исследование металла на различных этапах металлургического передела. В настоящей работе представлены результаты исследования процесса производства стали с использованием карбида кремния в качестве раскислителя при производстве конвертерной стали, выплаваемой в конвертерах емкостью 350 т с верхней продувкой ЧАО «МК «Азовсталь». На основе данных о химическом составе и температуре металлического расплава, полученных в условиях кислородного конвертирования, с использованием пакета прикладных программ StatSoft Statistica 10.0 выполнен анализ влияния карбида кремния на значимость различия средних значений химического состава конвертерного расплава.

**Ключевые слова:** конвертер, металлический расплав, раскисление, карбид кремния, химический состав, различия средних.

**V.I. Bondar, L.I. Tarasyuk, I.M. Kostirya. Investigation of an oxygen-converter semi-fabricate deoxidation possibility by lump silicon carbide for the purpose of improving production quality index.** The most important operation in steelmaking is rational deoxidation of metal and slag, including deoxidation technology and the choice of deoxidizers. This action directly influences the number of non-metallic inclusions and their properties. The choice of both the deoxidizer type and deoxidation technology is tackled by each metallurgical enterprise in its own way. Nowadays, various metallic and nonmetallic materials used for metal deoxidation have found widespread use. These include the traditional ones – ferroalloys, pig-iron and powdered aluminum, and the wastes from metallurgical industries: aluminum, vanadium and abrasive slags, silicon carbide that have found wide application of late. At present, it has become quite obvious that the use of various types and techniques of deoxidation and out-of-furnace treatment of metal melt makes it possible to solve many problems in each specific production. In doing so, it is possible to solve the following tasks: to regulate the number and composition of non-metallic inclusions; to reduce the cost of steel due to the optimization of metallurgical processing, in relation to specific production conditions; to ensure the required quality of the products. Therefore, work aimed at further improving the methods of out-of-furnace processing in each specific production is, of course, promising and relevant. The prerequisite for the choice of deoxidation methods and the choice of deoxidizers as well as after-furnace treatment should be a comprehensive study of the metal at various stages of the metallurgical redistribution. This paper presents the results of the study of the steel production process using silicon carbide as a deoxidizer in the production of converter steel, smelted in 350 t converters with top blowing of Azovstal Iron and Steel Works. Based on the data on the chemical composition and temperature of the metal melt obtained in the conditions of oxygen conversion, using the StatSoft Statistica 10.0 application software package, the analysis of silicon carbide effect on the significance of the dif-

*ference in the average chemical converter melt composition has been made.*

**Keywords:** *converter, metal melt, deoxidation, silicon carbide, chemical composition, average differences.*

**Постановка проблеми.** Одним з найважливіших напрямків розвитку металургії чорних металів є підвищення якості металопродукції, що випускається при одночасному зниженні її собівартості. Рішення даної проблеми визначається удосконаленням процесу виробництва сталі на кожному етапі металургійного переділу.

Багаточисленними дослідженнями показано, що одним з основних чинників, що визначають кінцеві властивості металопродукції, є кількість, морфологія і розподіл неметалевих включень в сталі. Тому присутність в сталі небажаних включень може нівелювати всі зусилля, витрачені на розробку її складу і технологію виробництва. Технологія виробництва сталі, що використовується в даний час, передбачає при випуску металу з конвертера в ківш попереднє розкислення. Як розкислювачі використовуються чушковий алюміній (первинний, вторинний), феросиліцій, силикокальцій та інше.

Витрата конкретного розкислювача регламентується особливостями технології сталеплавильного агрегату, наявністю спеціального обладнання, окислення металу і, відповідно, наявністю зазначених матеріалів.

Найбільш поширеним є спосіб попереднього розкислення сталі чушковим алюмінієм. Однак при цьому виникають певні проблеми, пов'язані з утворенням неметалічних включень, що важко видаляються з розплаву, типу  $Al_2O_3$ , а також труднощі під час розливання металу, особливо на машинах безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) (затягування стаканчика).

Існуюча на ПАТ «МК «Азовсталь» технологія розкислення заснована на високій спорідненості до кисню карбиду кремнію, при цьому приймається, що активність цього комплексного розкислювача близька до активності алюмінію і набагато вища, ніж окремо у кремнію і вуглецю.

Найбільш доцільно віддавати карбід кремнію безпосередньо під струмінь при випуску металу з печі, що пов'язано з невисокою щільністю SiC і можливістю хорошого перемішування розплаву в цьому технологічному періоді плавки.

Підвищення ефективності технології плавки вимагає проведення всебічного вивчення способу попереднього розкислення з використанням карбиду кремнію.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З практики використання карбиду кремнію в якості розкислювача відомо про комплексну технологію виробництва сталі для металокорду в умовах БМЗ в надпотужній 100-тонній дуговій сталеплавильній печі [1].

Розплав оброблявся на установці позапечної обробки і розливався на МБРЗ в блюми перетином 250×300 мм. Карбід кремнію (190...300 кг) при розкисленні сталі присаджувався в стальковш з навуглецювателем типу «А» (114...176 кг) і FeMn78 (480...600 кг). Зміст вуглецю після випуску – 0,24% (мас.) зі зміною в інтервалі 0,17...0,32%; зміст кремнію – 0,09% зі зміною в межах 0,04...0,19%. Коефіцієнт засвоєння кремнію з SiC склав в середньому 0,85, вуглецю з SiC і навуглецювателя – 0,92%.

При виплавці сталей рядового сортаменту дослідний матеріал використовувався на випуску плавки з печі. Хімічний склад показав, що зміст вуглецю [C] і [Si] не змінився. Це свідчить про розкислення карбідом шлаку, а не металевого напівпродукту. На закінчення автори [1] стверджують, що використання SiC для розкислення і легування економічно доцільно на середньо вуглецевих, високо вуглецевих і кордових марках сталі. Коефіцієнт засвоєння [Si] і [C] з матеріалу ККМ-88 при виплавці всіх марок сталей склали, відповідно, 0,85 і 1,00.

У роботах [2, 3] наводяться дані про те, що карбід кремнію відповідної фракції і хімічного складу є альтернативою феросиліцію (FeSi65) для розкислення сталі і чавуну. Відсутність в SiC шкідливих домішок, які має FeSi65, а саме – кольорові метали, неметалеві включення, розчинені гази, значно покращує якість сталі по структурі неметалічних включень. Частинки SiC – ефективний відновник шлаку і прекрасне джерело [Si] і [C]. Низький зміст в ньому алюмінію [Al], сірки [S] і азоту [N] роблять його рентабельним матеріалом для заміни FeSi65 або SiMn – силікомарганцю. На думку авторів [2, 3], SiC є унікальним матеріалом, який при його засвоєнні конвертерним напівпродуктом працює і як паливо, і як джерело енергії, яка може бути використана для збільшення співвідношення чавуну і брухту на користь останнього. SiC забезпечує

більшу екзотермічність процесу його засвоєння, ніж FeSi65 при використанні [Si] як розрахункової одиниці. Тому у порівнянні з вугіллям SiC забезпечує більше заміщення чавуну і більш низькі викиди, що містять сполуки сірки і монооксиду вуглецю {CO}. «Екзотермічні властивості» SiC економічно ефективні для підприємств з дефіцитом чавуну або тимчасової зупинки доменного циклу. SiC також може використовуватися для підвищення температури плавки.

Відповідно до вищевикладеного, автори [2, 3] пропонують два технологічних напрямки використання в сталеплавильному переділі: технологія розкислення і легування сталі і технологія підігріву розплаву за рахунок засвоєння SiC.

Пропонується дві технології з використання карбіду кремнію в сталеплавильному виробництві: технологія розкислення і легування сталі і технологія підігріву металу за рахунок спалювання SiC [2, 3]. Технологія розкислення заснована на високій спорідненості карбіду кремнію до кисню, при цьому активність комплексного розкислювача (SiC) близька до активності алюмінію і набагато вища, ніж окремо у кремнію і вуглецю [2, 3]. Найбільш доцільно вводити карбід кремнію безпосередньо на струмінь при випуску металу з печі (це пов'язано з невисокою щільністю SiC і можливістю хорошого перемішування в даний час) [2, 3]. Засвоєння SiC коливається від 70 до 80% залежно від окислення металу і шлаку в ковші. Від 20 до 30% кремнію і вуглецю переходить в метал в якості легуючих компонентів, через що можливість використання SiC обмежена по нижній межі марками сталі з отриманням Si <0,15% і C <0,12%. В даний час при наявності агрегатів піч-ківш, остаточне розкислення також може бути забезпечено зернами карбіду кремнію шляхом розкислення шлаку в ківші, тим самим можна повністю відмовитися від алюмінію. При розлив металу на дрібно сортових МБЛЗ повністю виключається проблема затягування стаканчика шлаком (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Ефективність даного методу полягає в прямій заміні карбідом кремнію чушкового алюмінію і зниження споживання феросиліцію, так як частина кремнію з SiC йде на легування сталі. Низький вміст алюмінію, сірки і азоту роблять його дуже економічно ефективним матеріалом для заміни феросиліцію або силікомарганцю [2, 3].

Відомі технічні рішення, пов'язані з використанням кускового карбіду кремнію (SiC) фракції більше 1-го міліметра і з вологістю менше 1-го відсотка і його брикетованого відсіву з кінцевим вмістом в брикетах 70...90% SiC [4]. Винахід дозволяє знизити собівартість виробництва сталі і чавуну за рахунок заміни FeSi65 відсівами фракцій SiC, який за технологічними характеристиками перевершує FeSi65, так як містить до 30% загального вуглецю і істотно підвищує засвоєння кремнію в металі.

В роботі [5] викладено результати термодинамічного аналізу поведінки карбіду кремнію в залізобуглецевих розплавах. Наведено результати моделювання кінетики взаємодії карбіду кремнію з розплавом. Аналітично визначено залежність часу розчинення SiC від його радіуса. Встановлено раціональний розмір часток SiC, що застосовується для розкислення металу в ковші. Відзначається ефективність заходів щодо використання SiC внаслідок прямої заміни SiC феросиліцію. Відзначається ефективність заходів щодо використання SiC внаслідок прямої заміни феросиліцію і значного поліпшення якості сталі за структурою неметалічних включень. При розливанні металу на МБЛЗ знижується проблема затягування стаканчика шлаком внаслідок скорочення витрати алюмінію в якості розкислювача. Вказується, що найбільш доцільно віддавати SiC безпосередньо під струмінь при випуску металу з печі, що пов'язано з невеликою щільністю SiC і можливістю перемішування на цій стадії плавки.

Взаємодія карбіду кремнію з залізом представляє особливий інтерес ще й тому, що SiC використовується не тільки для розкислення і легування, а й у виробництві вогнетривів в чорній металургії. Зокрема, в роботі [6] автори вивчали взаємодію нанорозмірного SiC з оксидом заліза і спечених концентратом залізної руди (СКЗР) в широкому концентраційному інтервалі, середовищах і температурних режимах. Метою було створення високодисперсних порошкових продуктів, що синтезувалися в системах SiC-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і SiC-СКЗР. В результаті отримано порошковий продукт як результат взаємодії нанорозмірного SiC з оксидом заліза. На цій основі створено композити з металевою та керамічною матрицею на основі оксиду алюмінію і порошкового заліза.

Наступна сфера використання SiC в металургійному циклі сучасного виробництва обумовлена, на думку авторів [6], його високою теплопровідністю. Використання SiC дозволяє підвищити тепловий баланс в ході плавки, скоротивши при цьому частку рідкого чавуну. Еконо-

мічний ефект від впровадження у виробництво технології регулювання теплового балансу плавок дає і більш низька ціна SiC. Залежно від вмісту SiC в карборунді визначається і сфера його використання в сталеплавильному виробництві.

Вогнетривкі властивості SiC знайшли своє застосування і при футеровці термічних агрегатів сопел, конусів і інших вогнетривких виробів. Шляхом реакційного спікання з карборунду виготовляються футеровочні вогнетривкі плити [7]. Нітрідна зв'язка карбиду кремнію забезпечує підвищені характеристики міцності, збільшену термостійкість і більш тривалі терміни експлуатації і є оптимальним варіантом при виконанні футерування сучасних доменних печей.

**Метою дослідження** є вивчення особливостей процесу розкислення карбідом кремнію металевго напівпродукту, одержуваного в великовантажних ємністю 350 т кисневих конвертерах ПАТ «МК «Азовсталь» і формулювання пропозицій щодо його практичного використання.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження особливостей процесу розкислення металевго продукту карбідом кремнію проводили методом статистичної обробки результатів хімічного аналізу після стадії позапічної обробки металевго розплаву перед розливанням на МБЛЗ. Масиви були сформовані з плавок розкислення карбідом кальцію і без нього, окремо для двох, що працюють одночасно, великовантажних конвертерів. Для розкислення використовувався кусковий карбід кремнію марки SCM-7 поставки ТОВ НВП «Інтерметалл» (рис. 1). Матеріал (надалі модифікатор) вводився під струмінь в стальковш під час випуску металевго напівпродукту. Фракційний склад карбиду кремнію був в діапазоні від 5 до 50 мм. Вміст кремнію в ньому становить 52,2%, а вміст вуглецю – 20,0%. Модифікатор містить в перерахунку на чисті елементи 0,80% алюмінію, 0,3% титану і 2,0% заліза. У модифікаторі алюміній, титан, залізо і кальцій містяться у вигляді оксидів. Частково у вигляді оксиду в модифікаторі є і кремній в кількості до 5%.



Рис. 1 – Кусковий карбід кремнію марки SCM-7

Для вирішення поставленої мети використовувався інструментарій програмного пакета StatSoftStatistica 10. На першому етапі аналізу була реалізована перевірка відповідності розподілу випадкових величин масивів закону нормального розподілу. Нормальність розподілу змінної – це занадто жорстка вимога, тому в роботі обмежилися побудовою діаграм розмаху. Діаграми розмаху дозволяють візуально судити про наявність чи відсутність симетричності в розподілі кожної із змінних щодо її медіани. Якщо симетричність розподілу значень змінної щодо середнього її значення підтверджується, то вважається, що змінна розподілена відповідно до нормального закону розподілу. Як приклад, на рис. 2-7 представлені типові діаграми розмаху для найважливіших змінних хімічного складу металевго напівпродукту для першого і другого конвертерів. Діаграми розмаху несуттєво відхиляються від нормального розподілу, так як симетричність розподілу значень змінних щодо середнього значення підтверджується. Значення стандартної помилки для всіх середніх значень змінних на рисунках позначені прямокутниками, а значення стандартної помилки визначення середнього значення – відрізками прямих. Стандартна помилка визначалася як стандартне відхилення, поділене на квадратний корінь з обся-

гу вибірки. Стандартна помилка дозволяє задати довірчий інтервал для середнього значення. В діапазоні подвоєної стандартної помилки з обох боків від середнього значення з імовірністю приблизно 95% знаходиться середнє значення генеральної сукупності.

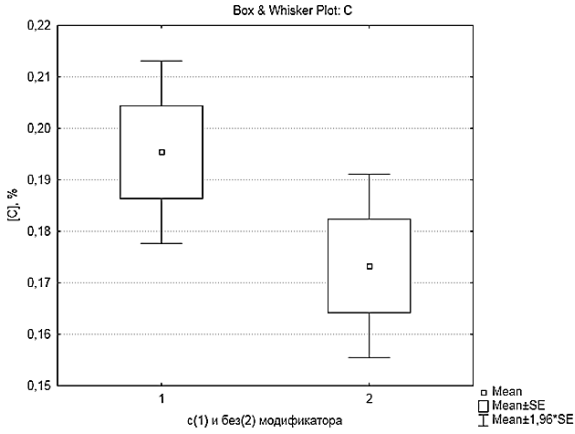


Рис. 2 – Діаграма розмаху змінної [C], перший конвертер

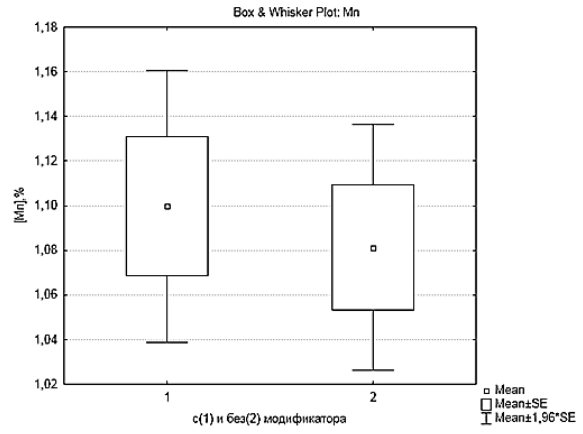


Рис. 3 – Діаграма розмаху змінної [Mn], перший конвертер

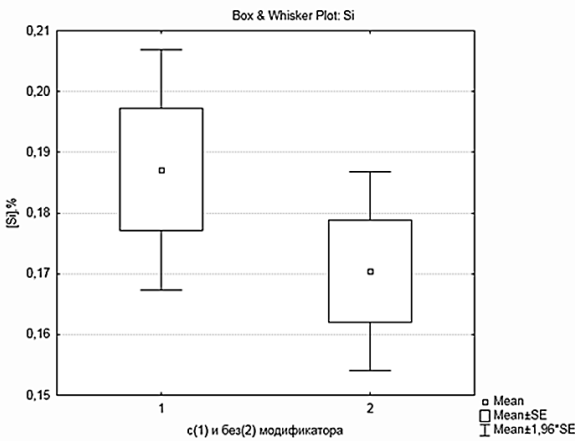


Рис. 4 – Діаграма розмаху змінної [Si], перший конвертер

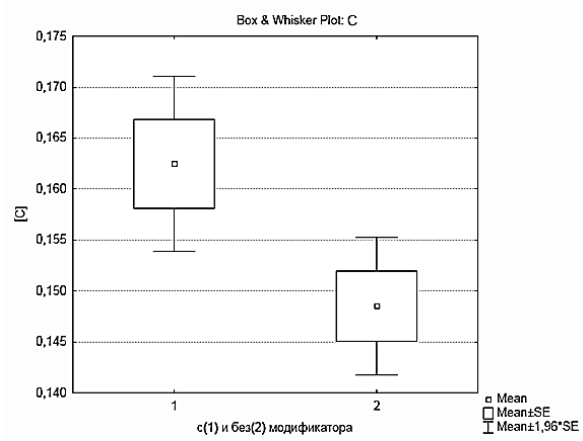


Рис. 5 – Діаграма розмаху змінної [C], другий конвертер

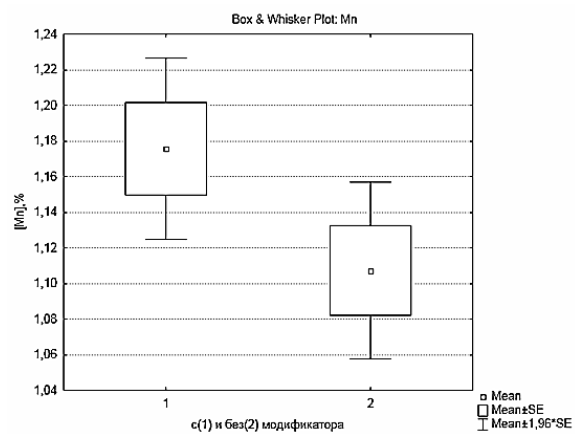


Рис. 6 – Діаграма розмаху змінної [Mn], другий конвертер

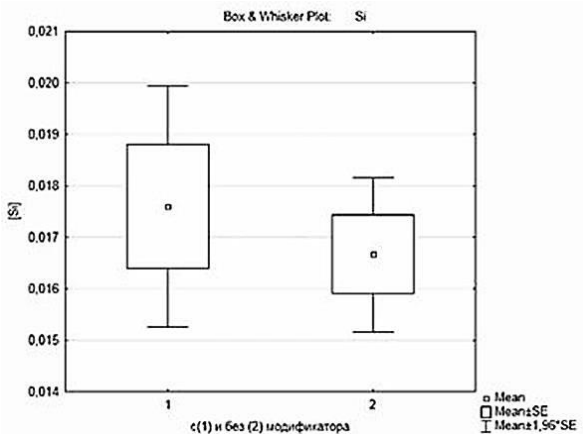


Рис. 7 – Діаграма розмаху змінної [Si], другий конвертер

У разі відповідності розподілу змінних нормальному закону розподілу, що і підтверджується діаграмами розмаху, далі необхідно встановити значимо чи незначимо відрізняються середні значення змінних для кожного масиву даних. Перший масив – масив даних для випадку застосування модифікатора, а другий масив – для випадку його відсутності. Для вирішення цього завдання використовувався метод *t*-критерію для незалежних вибірок. При використанні цього методу потрібне введення нової групуючої змінної, що характеризує стан з використанням модифікатора – «1» і «2» – за його відсутності. Спочатку слід встановити, значимо або незначимо відрізняються дисперсії кожної з змінних для значень «1» і «2» групуючої змінної. Для цього використовувалася статистика Левена. Її використання дозволило визначити значення *p*-рівня для критерію Левена.

Як приклад наводиться таблиця (табл. 1), дані якої дозволяють зробити висновок про ймовірність «нульової гіпотези» в відношенні дисперсій змінної – вміст марганцю [Mn], що порівнюється для значень групуючої змінної «1» і «2».

Таблиця 1

Основні значення статистики Левена для *t*-критерію змінної [Mn]

	Mean «1»	Mean «2»	t-value	Valid «1»	Valid «2»	Std.Dev. -«1»	Std.Dev. -«2»	Levene-F(1,df)	df-Levene	p-Levene
Mn	1,161	1,111	1,139	124	166	0,35802	0,38000	0,450804	288	0,5024

В самому кінці табл. 1 наведені дані статистики Левена. Під ці дані відведені три стовпці таблиці. Особливий інтерес представляє останнє значення, а саме значення *p*-рівня для Левена. Це значення більше ніж 0,05, тому дисперсії вибірок щодо змінної [Mn] істотно не відрізняються, а значення змінної належать до однієї і тієї ж генеральної сукупності. Такий висновок підтверджується і значеннями стандартних відхилень: 0,36 для першої вибірки і 0,38 – для другої. Якщо значення *p*-рівня менше, ніж 0,05, то дисперсії вибірок істотно відрізняються один від одного. У цьому випадку для коректного порівняння середніх використовувався метод *t*-критерію з роздільними оцінками дисперсій. В цьому випадку статистика Левена має вигляд (табл. 2).

Таблиця 2

Основні значення статистики Левена для *t*-критерію з роздільними оцінками дисперсій для змінної [C]

	Mean «1»	Mean «2»	t-value	Valid «1»	Valid «2»	Std.Dev. «1»	Std.Dev. «2»	Levene-F(1,df)	df-Levene	p-Levene
C	0,173	0,143	4,628	124	166	0,0749	0,0312	6,4531	288	0,0116

Якщо значення *p*-критерію (табл. 2) менше, ніж 0,05, то є всі підстави стверджувати, що між значеннями змінної 0,173 і 0,143 є істотні відмінності. Результати використання методу *t*-критерію для незалежних вибірок дали можливість оцінити значимість відмінності середніх для порівнюваних попарно масивів плавок від першого і другого конвертерів за січень і лютий 2019 р. Ці дані для ряду основних змінних хімічного складу наводяться в табл. 3-5.

Зіставлення даних табл. 3-6 показує, що використання модифікатора у всіх представлених випадках призводить до деякого збільшення вмісту вуглецю в металевому розплаві. Іншими словами, карбід кремнію виконує функції науглецювателя металевого розплаву. Вміст вуглецю збільшується і становить 10-21% в залежності від періоду виробництва сталі. Ті ж тенденції простежуються і для вмісту в ньому марганцю і кремнію. Вміст в розплаві цих легуючих при використанні модифікатора трохи вище, ніж в його відсутності, а саме, вміст марганцю зростає в інтервалі 2-5%, а кремнію – від 15-ти до 35%. Ці результати можуть служити основою для зменшення витрат науглецювателя і феросплавів, зокрема феромарганцю (FeMn78) і феросиліцію (FeSi65).

Таблиця 3

Порівняння вибірових середніх хімічного складу (Конв. 1; січень 2019 р.)

Незалежні змінні	Об'єми вибірок		Ймовірність нульової гіпотези (p)	Порівняння значень дисперсії	Порівняння середніх значень	
	стан «1»	стан «2»			стан «1»	стан «2»
Вуглець	124	166	0,012	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0,173	0,143
Марганець	124	166	0,502	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	1,160	1,110
Кремній	124	166	0,021	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0,195	0,169
Сірка	124	166	0,004	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0,006	0,007
Фосфор	124	166	0,353	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0,010	0,011
Алюміній	124	166	0,667	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0,032	0,033

Примітка до таблиці: тут і далі символи  $\sigma_1^2$  і  $\sigma_2^2$  позначають дисперсію змінної для станів «1» і «2», відповідно.

Таблиця 4

Порівняння вибірових середніх хімічного складу (Конв. 2; січень 2019 р.)

Незалежні змінні	Об'єми вибірок		Ймовірність нульової гіпотези (p)	Порівняння значень дисперсії	Порівняння середніх значень	
	стан «1»	Стан «2»			стан «1»	стан «2»
Вуглець	174	231	0,291	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	0,162	0,148
Марганець	174	231	0,044	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0,180	0,110
Кремній	174	231	0,005	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0,199	0,195
Сірка	174	231	0,051	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	0,006	0,007
Фосфор	174	231	0,548	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	0,010	0,010
Алюміній	174	231	0,915	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	0,033	0,033

Таблиця 5

Порівняння вибірових середніх хімічного складу (Конв. 1; лютий 2019 р.)

Незалежні змінні	Об'єми вибірок		Ймовірність нульової гіпотези (p)	Порівняння значень дисперсії	Порівняння середніх значень	
	стан «1»	стан «2»			стан «1»	стан «2»
Вуглець	54	313	0,728	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	0,171	0,152
Марганець	54	313	0,000	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	1,184	1,140
Кремній	54	313	0,000	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0,201	0,156
Сірка	54	313	0,000	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0,006	0,007
Фосфор	54	313	0,156	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	0,011	0,010
Алюміній	54	313	0,738	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	0,032	0,033

Таблиця 6

Порівняння вибірових середніх хімічного складу (Конв. 2; лютий 2019 р.)

Незалежні змінні	Об'єми вибірок		Ймовірність нульової гіпотези (p)	Порівняння значень дисперсії	Порівняння середніх значень	
	стан «1»	стан «2»			стан «1»	стан «2»
Вуглець	87	333	0,752	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	0,177	0,155
Марганець	87	333	0,000	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	1,167	1,147
Кремній	87	333	0,000	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0,208	0,154
Сірка	87	333	0,000	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0,006	0,007
Фосфор	87	333	0,156	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	0,011	0,011
Алюміній	87	333	0,738	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	0,031	0,032



Разом з тим вміст в розплаві сірки і фосфору залишається практично незмінним. Вміст сірки знаходиться на рівні 0,006-0,007% і не змінюється при переході від стану «1» (з модифікатором) до стану «2» (без модифікатора). Що стосується вмісту фосфору, то він становить в середньому 0,010-0,011%. У зв'язку з цим можна припустити, що використання модифікатора не погіршить рафінуючі властивості оксидного розплаву.

Практично важливо було встановити вміст алюмінію в розплаві в стані «1» в порівнянні зі станом «2». З алюмінієм пов'язано як кількість і морфологія, так і ступінь дисперсності неметалевих включень в сталі, в першу чергу, включень оксиду алюмінію  $Al_2O_3$ . Вміст алюмінію в металевому розплаві знаходиться на рівні 0,031-0,033% незалежно від використання карбиду кремнію для розкислення металевого розплаву. Більш точні відомості про вплив модифікатора на склад металевого розплаву можуть бути отримані з зіставлення середніх значень змінних складу і ступеня засвоєння легуючих металевого розплаву з урахуванням класифікації за хімічним складом сталей, що виробляються.

### Висновки

1. Отримані результати дозволяють стверджувати, що використання карбиду кремнію в якості розкислювача, що вводиться під струмінь металевого напівпродукту при випуску його з конвертера, дозволить зменшити витрату науглецювача металевого розплаву. При цьому вміст сірки і фосфору в металевому розплаві не збільшується і знаходиться на рівні 0,006-0,007% і 0,010-0,011%, відповідно. Це створює перспективи поліпшення техніко-економічних показників киснево-конвертерного переділу.

2. Використання карбиду кремнію в якості розкислювача, призводить до підвищення вмісту марганцю і кремнію в металевому розплаві на 2-5% і 15-35%, відповідно, як показує аналіз порівняння середніх його хімічного складу перед розливанням. Це підвищення вмісту легуючих створює перспективи для зменшення в подальшому витрати феросплавів і підвищення ефективності киснево-конвертерного процесу.

3. Подальші дослідження слід вести в напрямку з'ясування особливостей термодинаміки процесу взаємодії карбиду кремнію з металевим напівпродуктом. При цьому необхідна кількісна оцінка ступеня засвоєння основних легуючих металевого розплаву при використанні карбиду кремнію з урахуванням сортаменту сталей.

### Перелік використаних джерел:

1. Константинов М.Е. Исследование возможности использования карбида кремния для раскисления и легирования стали / М.Е. Константинов, А.В. Оленченко // *Литье и металлургия*. – 2004. – № 13 (31). – С. 79-82.
2. Коровин В.А. Термодинамика восстановления железа из электропечного шлака и изменение теплового баланса в печи / В.А. Коровин, Т.Д. Куриленко, П.П. Степанов // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеев*. – 2014. – № 2 (104). – С. 190-195.
3. Баландин Д.С. Исследование влияния технологии раскисления и легирования стали на степень усвоения легирующих элементов / Д.С. Баландин, С.А. Храпко // *Металлургия XXI столетия глазами молодых: тезисы докл. участ. Всеукр. науч.-практ. конф. студ.* – Донецк, 2011. – С. 213.
4. Пат. 2631570 Россия, МПК С 22 В 1/243, С 21 С 7/06. Комплексный раскислитель стали на основе кускового карбида кремния / В.А. Алексеенко. – № 2015148356; заявл. 11.11.2015; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 27. – 5 с.
5. Деревянко И.В. Кинетическая модель взаимодействия карбида кремния с железоуглеродистым расплавом // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. – № 3. – С. 30-32.
6. Тимошенко Я.Г. Особливості структуроутворення композиційної кераміки на основі оксиду алюмінію за участю продуктів відновлення оксиду заліза нанорозмірним нестехіометричним карбідом кремнію / Я.Г. Тимошенко, М.П. Гадзира // *Порошкова металургія*. – 2015. – № 03/04. – С. 70-77.
7. Li H. The Application of SiC in Converter Steelmaking / Hailing Li, Qichun Peng, Youhua Wang // *Proceedings of the 3rd International Conference on Mechatronics and Information Technology (ICMIT 2016)*. – 2016. – Pp. 786-790. – Mode of access: [DOI: 10.2991/icmit-16.2016.142](https://doi.org/10.2991/icmit-16.2016.142).

## References:

1. Konstantinov M.E., Olenchenko A.V. Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniia karbida kremniia dlia raskisleniia i legirovaniia stali [Study of the possibility of using silicon carbide for deoxidation and alloying of steel]. *Lit'e i metallurgiiia – Foundry production and metallurgy*, 2004, no. 13 (31), pp. 79-82. (Rus.)
2. Korovin V.A., Kurilenko T.D., Stepanov P.P. Termodinamika vosstanovleniia zheleza iz elektroprechnogo shlaka i izmenenie teplovogo balansa v pechi [Thermodynamics of iron reduction from electric furnace slag and change in heat balance in the furnace]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseev – Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, 2014, no. 2 (104), pp. 190-195. (Rus.)
3. Balandin D.S., Hrapko S.A. Issledovanie vliianiia tekhnologii raskisleniia i legirovaniia stali na stepen' usvoeniia legiruiushchikh elementov. *Tezisy dokl. uchast. Vseukr. nauch.-prakt. konf. stud. «Metallurgiiia XXI stoletiiia glazami molodykh»* [Study of the influence of steel deoxidation and alloying technology on the degree of assimilation of alloying elements. Proceedings of the All-Ukr. Sci.-Pract. Stud. Conf. «Metallurgy of the 21st Century through the Eyes of the Young»]. Donetsk, 2011, p. 213. (Rus.)
4. Alekseenko V.A. *Kompleksnyi raskislitel' stali na osnove kuskovogo karbida kremniia* [Complex deoxidizing steel based on lump silicon carbide]. Patent RU, no. 263157, 2017. (Rus.)
5. Derevyanko I.V. Kineticheskaia model' vzaimodeistviia karbida kremniia s zhelezouglerodistym rasplavom [Kinetic model of the interaction of silicon carbide with an iron-carbon melt]. *Metallurgicheskaia i gornorudnaia promyshlennost' – Metallurgical and Mining Industry*, 2006, no. 3, pp. 30-32. (Rus.)
6. Timoshenko Ya.G., Gadzira M.P. Osoblivosti strukturoutvorennia kompozitsiinoi keramiki na osnovi oksidu aliuminiu za uchastiu produktiv vidnovlennia oksidu zaliza nanorozmirmim nestekhiometrichnim karbidom kremniu [The Structurization of Aluminum Oxide Composite Ceramics Involving Products of Iron Oxide Reduction by Nanosized Nonstoichiometric Silicon Carbide]. *Poroshkovaia metallurgiiia – Powder Metallurgy*, 2015, no. 03/04, pp. 70-77. (Ukr.)
7. Hailing Li, Qichun Peng, Youhua Wang. The Application of SiC in Converter Steelmaking. Proceedings of the 3rd International Conference on Mechatronics and Information Technology (ICMIT 2016), 2016, pp. 786-790. doi: 10.2991/icmit-16.2016.142.

Рецензент: С.Л. Макуров  
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 18.07.2019